Сандуляк Александр Васильевич

д-р техн. наук, профессор

Сандуляк Анна Александровна

д-р техн. наук, профессор

Полисмакова Мария Николаевна

канд. техн. наук, доцент

Сандуляк Дарья Александровна

канд. техн. наук, инженер

Киселев Дмитрий Олегович

аспирант

ФГБОУ ВО «Московский технологический университет»

г. Москва

DOI 10.21661/r-462072

ОБОСНОВАНИЕ КООРДИНАТ И РАЗМЕРОВ ЗОНЫ СТАБИЛЬНОГО МАГНИТНОГО СИЛОВОГО ФАКТОРА В МАГНЕТОМЕТРЕ ФАРАДЕЯ

***Аннотация:** на примере сферических полюсных наконечников (рекомендуемых к использованию в магнетометрах Фарадея) доказано безусловное наличие зон, где индивидуальные значения градиента и магнитного силового фактора являются стабильными (в окрестности экстремумов этих параметров), установлены и сопоставлены их координаты. Показано, что абсциссы экстремумов остаются практически неизменными (для каждого из расстояний между полюсными наконечниками, независимо от токовой нагрузки), причем экстремумы силового фактора располагаются на 30–40% ближе к осевой линии полюсов, чем абсциссы экстремумов градиента.*

***Ключевые слова:** полюсные наконечники-полусферы, межполюсная область, индукция, магнитный силовой фактор, зона, окрестность экстремума.*

Применение метода Фарадея (посредством так называемых весов Фарадея, обычно называемых в зарубежной литературе Faraday magnetometer), в отличие

от других методов, делает технически доступным решение задачи получения информации о магнитной восприимчивости изучаемых образцов в широком диапазоне как низких, так и высоких температур. При этом важно, что для полноценной реализации метода достаточно использовать всего лишь малые (зачастую оправдано малые) образцы: не только сплошные, но и дисперсные, в частности, порошковые. Например, это обстоятельство зачастую может стать ключевым в решении различных вопросов магнитофореза и магнитоконтроля ферропримесей природных и техногенных сред [1–7], когда приходится иметь дело с объективно малообъемными пробами дисперсной примесной фазы этих сред.

О возможности сравнительно несложного и достаточно точного решения весьма широкого круга задач, преимуществах, а в ряде случаев – предпочтительности магнетометра Фарадея в сравнении с альтернативными магнетометрами (например, с широко применяемыми SQUID и вибрационными магнетометрами, включая возможности полезного взаимодополнения данных) речь идет в [8–15]. В частности, в [8] он позиционируется как более чувствительный – в сравнении вибрационным магнетометром, а в [9; 14; 15] констатируется хорошее согласие (малая разница) между измерениями – в сравнении с SQUID-магнетометром.

При использовании любого из магнетометров Фарадея (той или иной конструкции) всегда важным должно являться решение задачи по установлению местоположения рабочей (локальной) зоны в области созданного градиентного поля – зоны для размещения в ней малообъемного исследуемого образца с целью измерения действующей на него магнитной силы и последующего определения его магнитной восприимчивости.

В [16] на примере электромагнитной системы с полюсными наконечниками-полусферами показан результативный подход к решению этой задачи и выполнен первый, определяющий этап исследований, ограничивающийся обоснованием и реализацией способа выявления местоположения и размеров зоны стабильных значений градиента индукции B поля: $gradB$. Необходимым стартовым действием для этого является обязательное получение в области создаваемого градиентного поля координатной (в направлении x : в радиальном направлении

плоскости симметрии межполюсной области, по линии действия пондеромоторной силы и противоположном ей) характеристики индукции B или напряженности H поля [16]. Тогда, располагая именно такой координатной характеристикой, например, индукции B , даже по самому ее виду вполне можно судить о наличии и местоположении зоны стабильных значений градиента – в случае, если эта характеристика извилистая, с четко видимым перегибом (в математическом понимании) [16]. Так, участок (сравнительно короткий) этой извилистой характеристики в зоне перегиба, поддающийся линейной аппроксимации, свидетельствует о стабильном (примерно постоянном) значении на этом участке параметра $gradB = dB/dx$.

И это хорошо демонстрируется [16] наличием экстремума на специально получаемой (путем дифференцирования координатной, предварительно аппроксимированной, характеристики параметра B) координатной характеристики параметра $gradB$ – с координатой (абсциссой) экстремума $x = x_{extr} = (x_{extr})_{gradB}$, в окрестности которого значения $gradB$ практически стабильны. Тогда вполне можно ожидать (подтверждение приведено ниже), что и координатная характеристика параметра $BgradB$ (столь же важного) будет иметь экстремум с абсциссой (разумеется, иной, чем для характеристики градиента) $x = x_{extr} = (x_{extr})_{BgradB}$. При этом искомая зона, где значения $BgradB$ практически стабильны – в окрестности экстремума этой характеристики.

В [16] с использованием упоминавшейся выше электромагнитной системы, в которой градиентное магнитное поле создавалось при помощи полюсных накопечников-полусфер диаметром 100 мм, эксперименты выполнены при различных значениях тока питания обмоток I : от 4А до 30А и взаимного удаления накопечников b : от 3,5 мм до 15,3 мм.

Это позволило найти соответствующие координатные, экстремальные по виду, характеристики параметра $gradB = dB/dx$ [16] (рис. 1), абсциссы экстремумов которых при увеличении b смещаются в сторону бóльших значений b со-

гласно логарифмическому выражению: $x_{extr} = x_* \ln(b/b_*)$ при значениях феноменологических параметров $x_* = 5,7$ мм и $b_* = 0,82$ мм (независимо от токовой нагрузки) [16].

Полученные в [16] результаты, направленные на обнаружение зоны стабильного значения градиента, т.е. $gradB \cong \text{Const}$ или $gradH \cong \text{Const}$ (некоторые исследователи ограничиваются соблюдением именно этого условия), следует рассматривать, о чем уже говорилось выше, как первый важный этап в обнаружении рабочей зоны магнетометра Фарадея.

Рис. 1. Координатные характеристики градиента между полюсными наконечниками-полусферами диаметром 100 мм при их взаимном удалении $b = 3,5$ мм (а), $b = 6$ мм (б), $b = 8$ мм (в), $b = 10$ мм (г), $b = 11,5$ мм (д), $b = 13$ мм (е), $b = 15,3$ мм (ж); 1 – $I = 4$ А, 2 – $I = 8$ А, 3 – $I = 16$ А, 4 – $I = 30$ А

Если вести речь о рабочей зоне магнетометра Фарадея как зоне оговоренного во многих работах стабильного значения произведения индукции или напряженности на соответствующий градиент, т.е. как $B \cdot gradB \cong \text{Const}$ или $H \cdot gradH \cong \text{Const}$, именуя такое произведение магнитным силовым фактором

[17], то можно убедиться в следующем. Наличие экстремума на характеристике градиента $gradB$ (или $gradH$) гарантирует и наличие столь необходимого здесь экстремума на характеристике $B \cdot gradB$ (или $H \cdot gradH$), конечно же – с иной координатой экстремума $x = x_{extr} = (x_{extr})_{BgradB}$. При этом такую характеристику не трудно найти посредством умножения данных (опытных, аппроксимированных) B или H на данные (аналитические) $gradB$ или $gradH$.

На рис. 2 в доказательство этого факта показаны соответствующие характеристики $B \cdot gradB$, найденные указанным приемом с использованием первичных (полученных эмпирически и аппроксимированных полиномом четвертой степени) характеристик B , а также аналитически установленных на их основе характеристик $gradB$ (рис. 1) [16]. Как и ожидалось, найденные координатные характеристики $B \cdot gradB$ (тоже хорошо аппроксимируемые полиномом четвертой степени) имеют экстремальный вид, причем такой вид присущ различным случаям взаимного удаления b полюсных наконечников – от $b = 3,5$ мм до $b = 15,3$ мм (рис. 2).

Рис. 2. Координатные характеристики магнитного силового фактора между полюсными наконечниками-полусферами (обозначения в соответствии с рис. 1)

Примечательно, что абсциссы экстремумов магнитного силового фактора $B \cdot gradB$ (рис. 2 и табл. 1), несмотря на широкий диапазон изменения токовой нагрузки, для каждого из вариантов b остаются весьма близкими между собой (как и абсциссы экстремумов градиента $gradB$ [16] – см. рис. 1). Это указывает на возможность неизменного позиционирования изучаемого образца в магнитной системе магнетометра при изменении режимов исследований.

Таблица 1

Координаты экстремума x_{extr} магнитного силового фактора $BgradB$
при различных значениях взаимного удаления магнитных полюсов b
и тока питания обмоток I – по [16]

I, A	Значения x_{extr} (мм) при различных b (мм)						
	$b = 3,5$	$b = 6$	$b = 8$	$b = 10$	$b = 11,5$	$b = 13$	$b = 15,3$
4	6,03	8,49	9,80	10,80	11,10	12,45	12,40
8	6,02	8,56	9,81	11,00	11,21	12,34	12,32
16	5,85	7,81	9,58	11,04	11,10	12,17	12,74
30	5,75	7,71	9,59	10,94	11,17	12,39	12,92
	5,91	8,14	9,70	10,95	11,15	12,34	12,60

Заметим также, что значения абсцисс экстремумов характеристик $BgradB$ (рис. 2 и табл. 1) оказались заметно меньше чем значения абсцисс экстремумов характеристик $gradB$ (рис. 1) [16]: в основном, в 1.3–1.4 раза (практически независимо от взаимного удаления b полюсных наконечников). Другими словами, экстремум значений магнитного силового фактора ($BgradB$) между полюсными наконечниками-полусферами находится заметно левее (на 30–40% ближе к осевой линии полюсов) чем экстремум значений градиента ($gradB$).

Разумеется, зону в окрестности экстремума координатной характеристики $BgradB$ вполне можно считать зоной сравнительно стабильных значений $BgradB$, т.е. ответственной за координацию в ней изучаемого образца. При этом в изучаемой области (между указанными наконечниками-полусферами диаметром 100 мм) протяженность этой зоны составляет (по x), как это видно на рис. 2: от $(x_{extr} - 2...3 \text{ мм})$ до $(x_{extr} + 2...3 \text{ мм})$. Сама же величина x_{extr} при увеличении значений b (судя по представленной на рис. 2 и в табл. 1 информации о x_{extr} при различных значениях b) смещается в сторону больших значений x (рис. 3а). При этом по данным рис. 3а можно получить аналитическую (феноменологическую) зависимость влияния взаимного удаления b полюсных наконечников на значения абсциссы экстремума магнитного силового фактора x_{extr} . Так, представление этих данных в полулогарифмических координатах показывает, что они достаточно

хорошо здесь квазилинеаризуются (рис. 3б), указывая при феноменологических параметрах $x_* = 4,7$ мм и $b_* = 1,01$ мм на логарифмический вид функции:

$$x_{extr} = x_* \ln \frac{b}{b_*}, \quad (1)$$

Рис. 3. Зависимость абсциссы экстремума магнитного силового фактора (условного центра зоны его стабильности) от взаимного удаления полюсных наконечников-полусфер (а) и квазилинеаризация этих данных в полулогарифмических координатах (б)

Например, при взаимном удалении полюсных наконечников $b=10$ мм абсцисса экстремума магнитного силового фактора составляет $x_{extr} \cong 11$ мм, а размер зоны практически стабильных значений параметра B_{gradB} (в окрестности экстремума) составляет от $(11 - 2...3)$ мм = 8...9 мм до $(11 + 2...3)$ мм = 13...14 мм, что непосредственно видно на рис. 2г.

Список литературы

1. Sandulyak D.A. Development of a Combined Empirical and Computational Method of Multiple-Operation Magnetic Monitoring of Ferrous Particles / D.A. Sandulyak, A.A. Sandulyak, V.V. Sleptsov [et al.] // Measurement Techniques. – 2016. – V. 59. – Is. 5. – P. 526–531.
2. Сандуляк А.А. Функциональная экстраполяция массово-операционной характеристики магнитофореза как основа прецизионного метода контроля феррочастиц / А.А. Сандуляк, М.Н. Полисмакова, Д.В. Ершов [и др.] // Измерительная техника. – 2010. – №8. – С. 57–60.

3. Sandulyak A.A. Special solutions for magnetic separation problems using force and energy conditions for ferro-particles capture / A.A. Sandulyak, A.V. Sandulyak, Fethi B.M. Belgacem [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2016. – V. 401. – P. 902–905.
4. Sandulyak A.A. Use of the magnetic test-filter for magnetic control of ferroimpurities of fuels, oils, and other liquids (phenomenological and physical models) / A.A. Sandulyak, A.V. Sandulyak, V.A. Ershova [et al.] // Journal of Magnetism and Magnetic Materials. – 2017. – V. 426. – P. 714–720.
5. Sandulyak A.A. Alternatives of multiparameter expressions for filtration magnetophoresis efficiency / A.A. Sandulyak, A.V. Sandulyak, M.N. Polismakova // International Journal of Applied Physics. – 2016. – V. 1. – P. 62–68.
6. Sandulyak A.A. Specification of force influencing a particle in a magnetic field / A.A. Sandulyak, A.V. Sandulyak, M.N. Polismakova [et al.] // Proceedings of 2016 International Conference on Informatics, Management Engineering and Industrial Application (IMEIA 2016). – P. 275–280.
7. Sandulyak D.A. Functional Properties of Granular and Quasi-granular Ferromagnetic Material (Filter-matrix) in Magnetophoresis Technology / D.A. Sandulyak, A.B. Snedkov, A.A. Sandulyak [et al.] // Proceedings of the International Conference on «Materials Engineering for Advanced Technologies». – London. June 2015. – P. 663–665.
8. Lewis R.T. A Faraday type magnetometer with an adjustable field independent gradient // Review of Scientific Instruments. – 1971. – V. 42. – No. 1. – P. 31–34.
9. Kobayashi H. Structure, and magnetic and electrochemical properties of layered oxides, Li_2IrO_3 / H. Kobayashi, M. Tabuchi, M. Shikano [et al.] // Journal of Materials Chemistry. – 2003. – V. 13. – P. 957–962.
10. Seidov Z. Magnetic susceptibility and ESR study of the covalent-chain antiferromagnets TlFeS_2 and TlFeSe_2 / Z. Seidov, H.-A. Krug von Nidda, J. Hemberger [et al.] // Physical Review B. – 2001. – V. 65. – P. 014433 (1–7).

11. Slobinsky D. Fast sweep-rate plastic Faraday force magnetometer with simultaneous sample temperature measurement / D. Slobinsky, R.A. Borzi, A.P. Mackenzie [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2012. – V. 83. – P. 125104 (1–5).
12. Mexner W. An improved method for relaxation measurements using a Faraday balance / W. Mexner, K. Heinemann // Review of Scientific Instruments. – 1993. – V. 64 (11). – P. 3336–3337.
13. Blach T.P. A Faraday magnetometer for studying interstitially modified ferromagnets / T.P. Blach, E MacA Gray. // Meas. Sci. Technol. – 1994. – V. 5. – P. 1221–1225.
14. Riminucci A. Analytical balance-based Faraday magnetometer / A. Riminucci, M. Uhlarz, R. De Santis [et al.] // Journal of Applied Physics. – 2017. – V. 121. – P. 094701 (1–5).
15. B.G. Hosu Magnetic tweezers for intracellular applications / B.G. Hosu, K. Jakab, P. Bánki [et al.] // Review of Scientific Instruments. – 2003. – V. 74. – No. 9. – P. 4158–4163.
16. Сандуляк А.А. Подход к координации малообъемного образца при реализации пондеромоторного метода определения его магнитной восприимчивости / А.А. Сандуляк, А.В. Сандуляк, М.Н. Полисмакова [и др.] // Российский технологический журнал. – 2017. – Т.5. – №2. – С. 57–69.
17. Сандуляк А.В. Очистка жидкостей в магнитном поле. – Львов: Высшая школа, 1984. – 167 с.